

04.1;12.1

## Разработка горячего канала для плазмотрона постоянного тока

© М.Х. Гаджиев, Е.П. Пахомов, В.П. Петровский, Д.И. Юсупов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: makhach@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2023 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2023 г.

Принято к публикации 27 декабря 2023 г.

Создана конструкция горячего графитового канала для плазмотрона постоянного тока, обеспечивающая нагрев графитовой мишени до температуры выше 3000 К без возникновения „механической“ эрозии за счет создания более однородного стационарного газового потока аргона и азота плазмотроном постоянного тока. Оказалось, что в аргоне достаточно одной винтовой камеры, а в молекулярном газе (азоте) необходимо использовать винтовую камеру совместно с рассекателями.

**Ключевые слова:** плазмотрон, вход в атмосферу, графит, однородный поток газа, скорость потери массы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57514.19753

В рабочих условиях космического полета при входе в атмосферу на материал внешнего покрытия аппарата воздействует нестационарный (быстронарастающий — за несколько десятков секунд) однородный поток воздуха, нагревающий поверхность до 3000–4000 К [1,2].

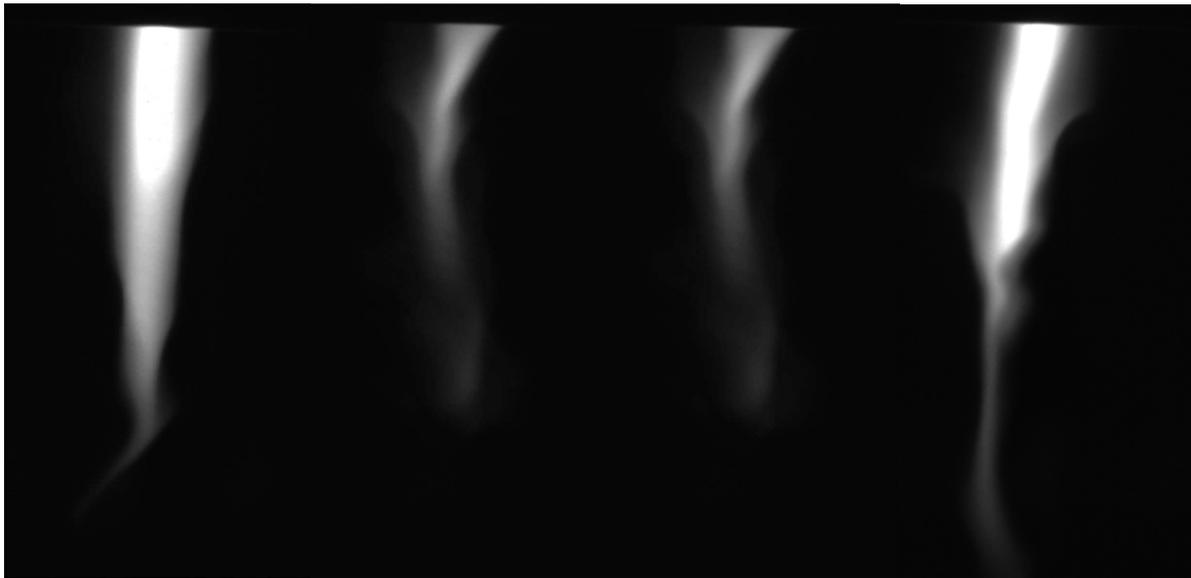
Для моделирования условий входа в атмосферу таких аппаратов необходим генератор потока горячего воздуха атмосферного давления, способный обеспечить необходимый разогрев поверхности модели. Существенно, что при входе в атмосферу поток, обтекающий аппарат, является пространственно однородным, обеспечивающим в каждой точке его поверхности монотонное (без пульсаций) увеличение плотности теплового потока по времени. В принципе такое обтекание можно смоделировать при использовании высокочастотных и сверхвысокочастотных генераторов плазмы, создающих диффузионный разряд. Но обеспечение требуемого уровня мощности для обдува достаточно крупногабаритных моделей сопряжено с использованием дорогого и сложного оборудования [3,4]. Привлекательно использование плазмотронов постоянного тока с более простыми источниками питания. Однако для таких генераторов потока горячего газа характерна принципиальная нестабильность получаемого потока по пространству и времени. Это обусловлено контрагированным характером разряда, когда сравнительно узкий горячий (с температурой более 8000 К для достижения необходимого уровня проводимости газа) шнур разряда — дуговой столб — хаотически перемещается в потоке остального „холодного“ газа из-за взаимодействия с собственным магнитным полем (рис. 1). В результате при обтекании такой струей газа преграды — мишени — распределение плотности теплового потока по нагреваемой поверхности оказывается хаотически пульсирующим, что вызывает генерацию в материале поверхности больших нестационарных термонапряжений из-за чередующихся тепловых расширений-сжатий зерен материала поверхности (в том числе в нормальном к

поверхности направлении). Это приводит к разрушению слабых мест (границ между зернами) материала, особенно неметаллического, освобождению зерен и их вымыванию потоком. Потерю массы поверхностью мишени по такому механизму будем называть „механической“ эрозией в отличие от остальных механизмов потери массы: испарения (сублимации) и химической эрозии (окисления) [2]. На кадрах видеосъемки это выглядит как вылет большого числа ярко светящихся микрочастиц (рис. 2). Кроме того, при больших скоростях нагрева (даже однородным газовым потоком) на нагреваемой поверхности возникает термонапряженное состояние, вызываемое расширением материала вдоль поверхности, с большими растягивающими напряжениями, направленными перпендикулярно поверхности на некотором расстоянии от нее. Это может вести к отколу участков поверхности.

Прямое лобовое (под углом 90°) нестационарное воздействие горячего ядра струи — собственно плазмы — на поверхность обдуваемого материала ведет к импульсному разогреву этого участка поверхности до температуры сублимации материала (когда равновесное давление пара становится равным или больше внешнего давления). При этом дополнительно поступающая энергия расходуется на испарение материала — его сублимацию.

Задача настоящей работы — создание приставки к плазмотрону, обеспечивающей нагрев мишени до 3000–4000 К без возникновения „механической“ эрозии за счет гашения пространственных пульсаций в создаваемом потоке нагреваемого газа и выравнивания поперечного температурного поля потока.

Для выравнивания температурного поля потока в канале в первую очередь необходимо увеличение температуры внутренней поверхности канала такой приставки до максимально возможного уровня, что возможно при использовании, например, графита. При существенном повышении температуры внутренней поверхности ка-



**Рис. 1.** Последовательные кадры видеосъемки струи плазмы аргона в открытое пространство из плазмотрона при токе дуги 150 А и расходе 0.8 g/s. Частота съемки 1 kHz.

нала происходит радикальная перестройка радиальных профилей температуры, плотности и скорости. Относительно малая скорость испарения графита позволяет при использовании инертных газов (аргона, азота) работать достаточно долго. При работе с воздухом время работы определяется скоростью химической эрозии графита, и в любом случае оно больше характерного времени входа в атмосферу космического аппарата. Поэтому требуемая приставка — это неохлаждаемый графитовый канал, являющийся продолжением водоохлаждаемого медного канала плазмотрона (анода).

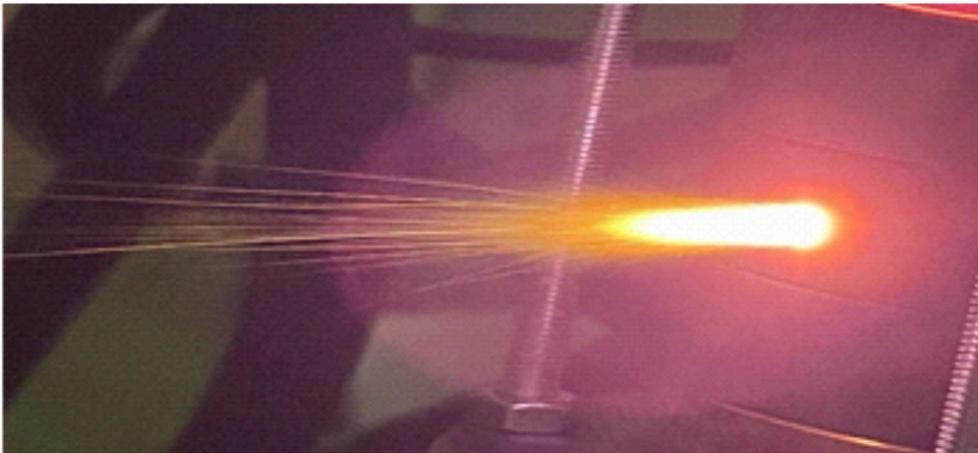
Рассмотрим поведение такого прямого графитового канала (секционированного для повышения термостойкости), пристыкованного к плазмотрону, после его выхода на стационарный тепловой режим. Температура внутренней поверхности канала не может превысить температуру сублимации углерода. В начале канала его внутренняя поверхность эффективно охлаждается излучением в замкнутую полость с холодной поверхностью — зону анода, межэлектродной вставки и катода плазмотрона. Чем дальше от анода, тем меньше пространственный угол излучения в эту холодную полость и тем выше температура внутренней поверхности канала. При значительном удалении от анода начинает сказываться снижение температуры (энергосодержания) потока из-за тепловых потерь канала. При большом уровне мощности потока в области, где температура достигнет уровня температуры сублимации, материал стенки будет испаряться. Соответственно профиль канала приобретет бочкообразный вид на участке больших тепловых нагрузок с уменьшением радиуса на выходе из-за конденсации сажи. Температура по длине внешней поверхности канала будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться.

Обработка такой конструкции выполнялась на трехэлектродном (катод со вставкой из лантанированного вольфрама—межэлектродная вставка—анод) плазмотроне с каналом диаметром (внутренним) 8 mm с вихревой подачей газа, КПД  $\sim 60\%$  для рабочего газа аргона и  $\sim 80\%$  для азота, который обеспечивает формирование на выходе слаборасходящейся ( $2\alpha = 12^\circ$ ) плазменной струи диаметром  $D = 5\text{--}12\text{ mm}$  с энтальпией 5–50 kJ/g и среднemasсовой температурой 5–10 kK, при полной электрической мощности дугового разряда 5–50 kW и расходе плазмообразующего газа 1–3 g/s [5,6]. В качестве основных контролируемых параметров были выбраны: а) истинная температура нагреваемого практически изотермически графитового образца марки МПГ-6 ( $\varnothing 8 \times 4\text{ mm}$ ) с моделью черного тела в нем — глухим сверлением ( $\varnothing 2 \times 6\text{ mm}$ ); б) его потеря массы.

Образец располагался в камере с внутренним диаметром 10 mm в конце графитового канала (рис. 3). Для улучшения равномерности нагрева образец закреплялся на трех острых графитовых винтах в камере с отражателем снизу — грибок.

Измерение температуры выполнялось с помощью яркостного пирометра Raytek 1M, работающего на длине волны  $1\text{ }\mu\text{m}$  (размер поля визирования 0.6 mm, погрешность 0.3% от измеряемой величины), через отверстие  $\varnothing 2.5\text{ mm}$  в боковой стенке канала. Максимальная измеряемая пирометром температура 3300 K. Масса образца и всех остальных элементов горячего тракта измерялась до и после каждого опыта. Диапазон токов дуги 150–450 А, расходов газа 0.8–1.5 g/s.

Первые опыты с использованием аргона показали, что имеет место большая эрозия части графитовых элементов, вызванная как наличием в аргоне кислорода, так и эжекцией воздуха. Переход на высокочистый ар-



**Рис. 2.** Вид струи плазмы аргона из отверстия для пирометрии диаметром 3 мм в графитовом канале при токе дуги 150 А и расходе 0.8 g/s.

гон (содержание кислорода  $2 \cdot 10^{-5}\%$ ) и соответствующие улучшения конструкции позволили достичь уровня эрозии около  $10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  при температуре образца выше 3300 К (зашкаливание показаний пирометра), что тем не менее, вероятно, больше скорости испарения углерода в этих условиях. Высокоскоростная киносъемка струи плазмы на выходе из графитового канала длиной 25 мм (рис. 1) показала, что создаваемый поток газа является сильно неоднородным и нестационарным. Оказалось, что остатки дугового шнура разряда интенсивно пульсируют с частотой более 10 kHz, в результате чего на поверхности мишени периодически случайно возникают локальные области сильного разогрева. Видно (рис. 2), что из оптического отверстия постоянно вылетает множество светящихся микрочастиц, а на верхней поверхности образца формируется почти в центре лунка глубиной 1–2 мм — результат „механической“ эрозии.

Стало понятно, что без подавления таких пульсаций потока обеспечить эрозию графита, соизмеримую со скоростью испарения, невозможно. Было выбрано два метода воздействия на поток. Исходным соображением явилось предположение, что помещать в поток нагреваемые элементы, подвергающиеся лобовому обтеканию, бесполезно. Воздействовать на поток можно только поверхностями, ориентированными под небольшим углом к направлению потока. Это может быть либо винтовое исполнение канала (рис. 3, а), либо выдвижение из боковых стенок узких рассекателей потока (рис. 3, б), ориентированных под углом 10–20° к направлению потока, либо совмещение этих двух способов (рис. 3, с). На рис. 3, д показан также общий вид длинного графитового канала (около 120 мм), разогревающегося за 3 min до яркого свечения (до 1100°C) в средней части.

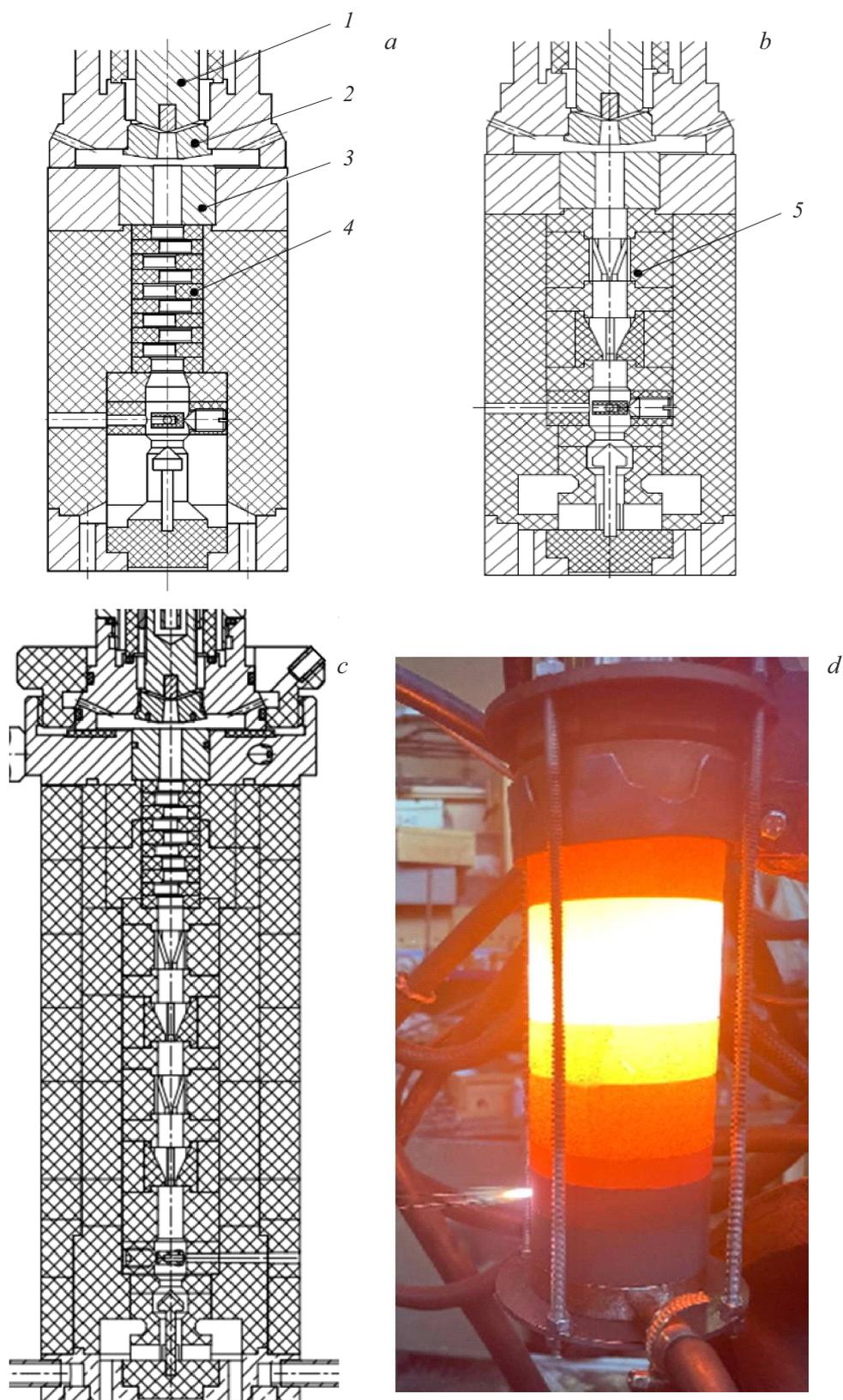
Винтовое исполнение показало, что упрощенное исполнение винтового канала из набора шайб с цилиндрическими сверлениями ( $\text{Ø} 8 \text{ mm}$ ), сдвинутыми от оси на 4 мм, устанавливаемых с последовательным поворотом на 90° друг за другом, оказалось вполне работоспособ-

ным. При этом система образующихся пережимов сечения канала способствует возникновению зон обратных течений. Температура разогрева шайб увеличивается с удалением от холодного медного канала анода (с уменьшением излучения на холодную медь плазмотрона).

При исполнении с рассекателями потока четыре или шесть узких клиньев с углом наклона к оси 10–25° устанавливаются в разрезном держателе и фиксируются сверху и снизу в радиальном направлении соответствующими вставками. Это ограничивает возможность колебаний горячего дугового шнура и улучшает перемешивание потока за счет пережатия сечения канала и образования зон обратных вихревых течений. Такое исполнение также показало хорошую работоспособность. При расположении рассекателей сразу за выходом плазмотрона отмечено значительное „обгорание“ клиньев. Вероятно, оптимальным является совместное использование этих подходов, как показано на рис. 3, с.

При работе с аргоном при использовании только винтовой графитовой вставки с одним витком без рассекателей для температуры образца около 3000 К получена скорость потери массы образца менее  $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  ( $0.05 \mu\text{m/s}$ ).

При работе с азотом такой винтовой вставки оказалось недостаточно, необходимо использовать и рассекатели. На конструкции с винтовой вставкой (один оборот винта) и с рассекателями (рис. 3, с) для температуры образца до 2300 К не зафиксировано потери массы, а при  $T = 2800 \text{ K}$  получено значение  $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , т.е. необходимо дальнейшее совершенствование конструкции. Дело в том, что в молекулярном газе неравномерность теплового воздействия потока на поверхность мишени существенно больше из-за больших величин степени диссоциации газа, чем степени ионизации, при сравнительно близких значениях энергий диссоциации молекул и ионизации атомов (9.8 и 14.5 eV соответственно у азота [7]). Увеличение длины винтовой вставки до 40 мм (с двумя оборотами винта) уменьшило ско-



**Рис. 3.** Испытанные конструкции плазматрона с горячими графитовыми каналами. *a* — винтовая камера, *b* — канал с расщепителями, *c* — канал с винтовой камерой и расщепителями, *d* — общий вид разогретого длинного графитового канала. 1 — катод, 2 — сопло, 3 — анод, 4 — винтовой канал, 5 — клиновидный расщепитель.

рость потери массы образца с  $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  при работе с винтовой камерой с шестью шайбами (с одним витком поворота потока) до  $5 \cdot 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ .

Таким образом, предложена и испытана конструкция плазмотрона с горячим графитовым каналом за ним для обеспечения нагрева мишени до температуры выше 3000 К без возникновения „механической“ эрозии за счет создания более однородного и равномерного потока горячего газа, что позволяет перейти к исследованию поведения графита в воздухе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J. Fay, F. Riddell, J. Aeronaut. Sci., **25** (2), 73 (1958). DOI: 10.2514/8.7517
- [2] Д.С. Михатулин, Ю.В. Полежаев, Д.Л. Ревизников, *Тепло-массообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты* (Янус-К, М., 2011).
- [3] S. Loehle, F. Zander, T. Hermann, M. Eberhart, A. Meindl, R. Oefele, J. Vaubaillon, F. Colas, P. Vernazza, A. Drouard, J. Gattaccese, *Astrophys. J.*, **837** (2), 112 (2017). DOI: 10.3847/1538-4357/aa5cb5
- [4] G. Herdrich, M. Auweter-Kurtz, H. Böhrk, M. Fertig, S. Löhle, in: *Proc. of the 5th Eur. Workshop*, ed. by K. Fletcher (Noordwijk, Netherlands, 2006), ESA SP-631, id. 50. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/2006ESASP.631E..50H>
- [5] Э.Х. Исакаев, О.А. Синкевич, А.С. Тюфтяев, В.Ф. Чиннов, ТВТ, **48** (1), 105 (2010). [E.Kh. Isakaev, O.A. Sinkevich, A.S. Tyuftyaev, V.F. Chinnov, *High Temp.*, **48** (1), 97 (2010). DOI: 10.1134/S0018151X10010141].
- [6] М.Х. Гаджиев, Ю.М. Куликов, Э.Е. Сон, А.С. Тюфтяев, М.А. Саргсян, Д.И. Юсупов, ТВТ, **58** (1), 15 (2020). DOI: 10.31857/S0040364420010068 [M.Kh. Gadzhiev, Yu.M. Kulikov, E.E. Son, A.S. Tyuftyaev, M.A. Sargsyan, D.I. Yusupov, *High Temp.*, **58** (1), 12 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X2001006X].
- [7] Э.И. Асиновский, А.В. Кириллин, В.Л. Низовский, *Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте*, 2-е изд., испр. и доп. (Физматлит, М., 2008).